



## HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe

Philippe Drobinski, Véronique Ducrocq, Philippe Arbogast, Claude Basdevant, Sophie Bastin, Laurent Béguery, Sophie Belamari, Karine Béranger, Olivier Bock, Marie-Noëlle Bouin, et al.

### ► To cite this version:

Philippe Drobinski, Véronique Ducrocq, Philippe Arbogast, Claude Basdevant, Sophie Bastin, et al.. HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe. La Météorologie, 2013, 80, pp.23-36. 10.4267/2042/48792 . hal-00828758

**HAL Id: hal-00828758**

**<https://hal.science/hal-00828758>**

Submitted on 7 Mar 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe

## Résumé

D'initiative française, le projet international HyMeX a pour objectif d'améliorer la compréhension du cycle de l'eau en Méditerranée, de sa variabilité, de l'échelle de l'événement météorologique aux échelles saisonnières et interannuelles, et de ses caractéristiques sur une décennie, dans un contexte de changement global. Le projet est motivé par le rôle déterminant des processus de méso-échelle, couplés entre l'atmosphère, la mer et la terre, sur la variabilité du système climatique et sur le déclenchement d'événements hydrométéorologiques extrêmes (précipitations et inondations, vents forts et convection océanique, canicules et sécheresses). Le projet vise enfin à évaluer les conséquences de ces événements extrêmes sur la vulnérabilité sociale et économique de cette région et sa capacité d'adaptation.

## Abstract

### HyMeX, investigating the Mediterranean water cycle

Initiated by the French community, the HyMeX international project aims to improve our understanding of water cycle in the Mediterranean, its variability from meteorological event to seasonal and interannual scales, and its characteristics over a decade in a context of global change. The project is motivated by the role of mesoscale processes, coupled between the atmosphere, land and sea, on the climate system and the onset of extreme hydro-meteorological events (precipitation and flash-flooding, strong winds and ocean convection, heat waves and droughts). The project also aims to assess the consequences of these extreme events on the social and economic vulnerability of this region and adaptability.

Philippe Drobinski<sup>(1)</sup>, Véronique Ducrocq<sup>(2)</sup>, Philippe Arbogast<sup>(2)</sup>, Claude Basdevant<sup>(1)</sup>, Sophie Bastin<sup>(3)</sup>, Laurent Beguery<sup>(4)</sup>, Sophie Belamari<sup>(2)</sup>, Karine Béranger<sup>(5)</sup>, Olivier Bock<sup>(6)</sup>, Marie-Noëlle Bouin<sup>(2)</sup>, Brice Boudevillain<sup>(7)</sup>, Olivier Bousquet<sup>(2)</sup>, Christophe Bouvier<sup>(8)</sup>, Isabelle Braud<sup>(9)</sup>, Jean-Christophe Calvet<sup>(2)</sup>, Cédric Champollion<sup>(10)</sup>, André Chanzy<sup>(11)</sup>, Martin Claude<sup>(12)</sup>, Philippe Cocquerez<sup>(13)</sup>, Laurent Coppola<sup>(14)</sup>, Sylvain Coquillat<sup>(15)</sup>, Dominique Courault<sup>(11)</sup>, Eric Defer<sup>(16)</sup>, Julien Delanoë<sup>(3)</sup>, Guy Delrieu<sup>(7)</sup>, Alexis Doerenbecher<sup>(2)</sup>, Nathalie Dorfliger<sup>(17)</sup>, Michel Estèves<sup>(7)</sup>, Claude Estournel<sup>(15)</sup>, Cyrille Flamant<sup>(3)</sup>, Nadia Fourrié<sup>(2)</sup>, Olivier Garrouste<sup>(2)</sup>, Eric Gaume<sup>(18)</sup>, Hervé Giordani<sup>(2)</sup>, Laurent Gomes<sup>(2)</sup>, Gregory Roberts<sup>(2)</sup>, Hervé Jourde<sup>(8)</sup>, Laurent Labatut<sup>(2)</sup>, Dominique Lambert<sup>(15)</sup>, Jérôme Le Coz<sup>(9)</sup>, Wolfgang Ludwig<sup>(19)</sup>, Céline Lutoff<sup>(20)</sup>, Jean-François Mahfouf<sup>(2)</sup>, Eric Martin<sup>(2)</sup>, Laurence Mastrorillo<sup>(21)</sup>, Nicole Mathys<sup>(22)</sup>, Yann Michel<sup>(2)</sup>, Mathieu Nuret<sup>(2)</sup>, Françoise Orain<sup>(23)</sup>, Sandra Perez<sup>(12)</sup>, Catherine Prigent<sup>(16)</sup>, Olivier Radakovitch<sup>(24)</sup>, Karim Ramage<sup>(25)</sup>, Evelyne Richard<sup>(15)</sup>, Jean-Louis Roujeau<sup>(2)</sup>, Odile Roussot<sup>(2)</sup>, Isabelle Ruin<sup>(7)</sup>, Frédérique Saïd<sup>(15)</sup>, Alfons Schwarzenboeck<sup>(26)</sup>, Karine Sellegri<sup>(26)</sup>, Samuel Somot<sup>(2)</sup>, Isabelle Taupier-Letage<sup>(27)</sup>, Pierre Testor<sup>(28)</sup>, Joël Van Baelen<sup>(26)</sup> et Jean-Pierre Vandervaere<sup>(7)</sup>

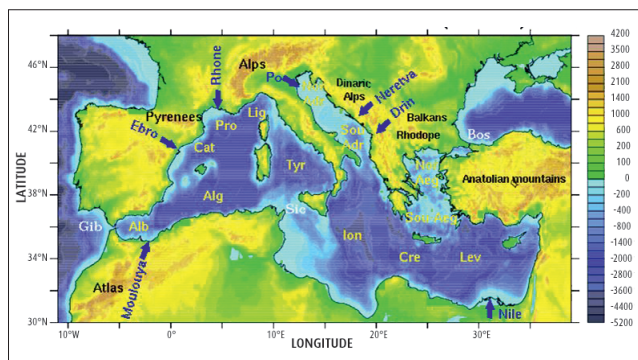
Les affiliations des auteurs se trouvent à la fin de l'article.

Le XXI<sup>e</sup> siècle est sans nul doute « le siècle de l'eau ». La plupart des pays dans le monde, et tout particulièrement ceux du pourtour méditerranéen, sont déjà confrontés à des problèmes de sécheresses et de pénuries d'eau à l'origine de crises alimentaires et d'épidémies, ou, au contraire, à de fortes pluies et à des inondations catastrophiques qui constituent des menaces sérieuses pour la vie des populations et pour les infrastructures. Situé à la transition entre régions subtropicales semi-arides et régions de moyenne latitude, le bassin méditerranéen est une région clé sur le plan climatique. Tout déplacement de cette zone de transition aura des conséquences environnementales, sociétales, économiques et politiques considérables. Dans le dernier rapport du GIEC (voir la liste des acronymes dans l'encadré en fin d'article), les modèles convergent sur l'assèchement du bassin méditerranéen avec le chan-

gement climatique. L'impact de ce changement global à l'échelle locale est difficile à prévoir en raison de la complexité géographique du bassin méditerranéen (bassin océanique quasi fermé, orographie marquée, climat contrasté et forte urbanisation) et des processus impliqués aux échelles les plus fines. Sous l'effet du changement global du climat, la fréquence des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes est susceptible d'augmenter dans la région Méditerranée (voir l'encadré à la page 24).

À cela s'ajoutent les demandes en eau et en énergie de la population méditerranéenne toujours croissante, qui exercent une pression importante sur les ressources en eau. Avec moins de 1 000 m<sup>3</sup> par personne et par an, 180 millions de personnes manquent d'eau en Méditerranée, ce qui représente plus de la moitié de la population mondiale qualifiée de « pauvre en eau »

Figure 1 - Localisations géographiques. Le détroit de Sicile (Sic) divise la mer Méditerranée en ses bassins occidental et oriental, composés des sous-bassins d'Alboran (Alb), algérien (Alg), thyrien (Tyr), adriatique (nord et sud) (Adr), ionien (Ion), égéen (nord et sud) (Aeg), crétois (Cre), levant (Lev), catalan (Cat), provençal (Pro) et ligurien (Lig). La mer Méditerranée est connectée à l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar (Gib), et à la mer Noire par le détroit du Bosphore (Bos).



(voir l'encadré à la page 25).

Dans le détail, le bassin méditerranéen présente un caractère unique qui résulte à la fois des conditions physiographiques et des développements historiques et sociétaux. La région Méditerranée définit généralement les terres entourant la mer Méditerranée et

présentant un climat méditerranéen. Celui-ci est caractérisé par de longs étés secs et par des hivers doux et pluvieux ; Köppen (1936) le définit comme celui durant lequel les précipitations hivernales sont plus de trois fois supérieures aux précipitations estivales. Entre ces terres, la mer Méditerranée s'étend sur 3 800 km, de Gibraltar au Levant, avec une côte couvrant une distance de 46 000 km (figure 1).

La mer Méditerranée est presque fermée. Elle est connectée à l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar, à la mer de Marmara et à la mer Noire par les détroits des Dardanelles et du Bosphore, et enfin à la mer Rouge par le canal de Suez. Les grandes péninsules, comme la péninsule Ibérique, l'Italie, la péninsule Balkanique et l'Asie Mineure, rapprochent la rive nord de la Méditerranée de la rive sud et elles lient, en partie, leurs climats respectifs. Le haut fond entre la Sicile et la Tunisie divise la mer Méditerranée en ses sous-bassins occidental et oriental. La région Méditerranée couvre une partie des continents européen, africain et asiatique. Les montagnes de moyenne et haute altitude qui entourent la mer Méditerranée ont une influence importante sur les mouvements atmosphériques de basse couche. Sur la rive nord, on trouve : les Pyrénées, les Alpes, les Alpes dynamiques et les montagnes des Balkans et du Rhodope. Ces massifs favorisent la formation de vents régionaux violents tels que le mistral et la tramontane (Georgelin et Richard, 1996 ; Drobinski et al., 2001 et 2005 ; Guénard et al., 2006), la bora (Grubišić, 2004) et les étésiens. Ces vents régionaux influencent notablement le climat méditerranéen par leur effet atmosphérique immédiat mais aussi, sur des échelles de temps long, par leur impact sur la circulation océanique de la mer Méditerranée (Lebeaupin-Brossier et al., 2011). Ils constituent aussi une barrière contre le vent humide provenant du large, ce qui favorise la formation de systèmes précipitants violents sur le continent (Ducrocq et al., 2008). Au sud, les montagnes de l'Atlas séparent la région influencée par le climat méditerranéen du désert du Sahara au climat aride. Le bassin méditerranéen s'étire à l'est jusqu'en Asie Mineure et au Levant jusqu'au Moyen Orient. La composante hydrologique du bassin méditerranéen est unique avec une importante dimension côtière. Seuls 21 bassins versants ont une surface

## La région Méditerranée : un « hot-spot » du changement climatique

Le concept de « hot-spot » pour le changement climatique peut être défini du point de vue de la vulnérabilité ou de la réponse climatique. Dans le premier cas, un « hot-spot » désigne une région où les impacts éventuels du changement climatique sur

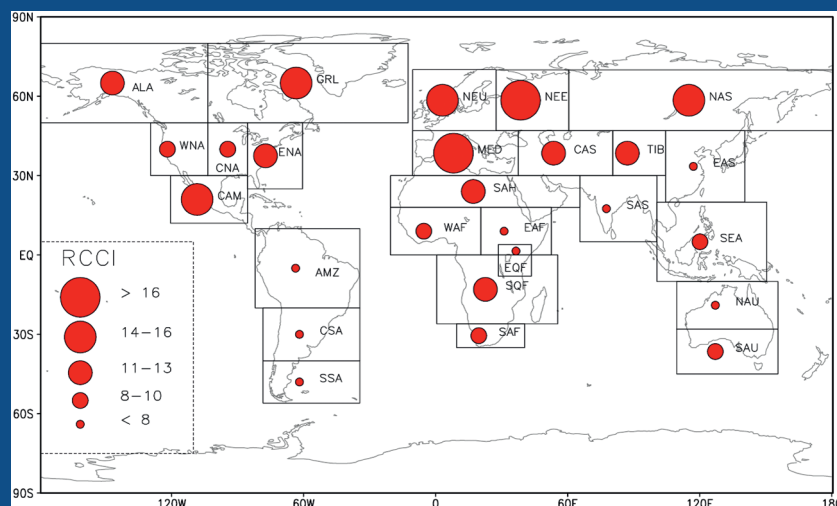


Figure E1 - Indicateur du changement climatique régional entre 2080-2099 et 1960-1979, pour 26 régions, calculé à partir de 20 modèles de circulation générale couplant océan et atmosphère et de 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A1B, A2 et B1) (voir <http://www-pcmdi.llnl.gov>). (Source : Giorgi, 2006).

l'environnement, ou sur différents secteurs d'activité, peuvent être particulièrement prononcés. Dans le deuxième cas, un « hot-spot » identifie une région dont le climat est particulièrement sensible aux changements globaux. Extraite de Giorgi (2006), la figure E1 montre la carte d'un indicateur du changement climatique régional entre 2080-2099 et 1960-1979, pour 26 régions, calculé à partir de 20 modèles de circulation générale couplant océan et atmosphère, et de 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A1B, A2 et B1). Les deux « hot-spots » les plus marqués sont la région Méditerranée et l'Europe nord-orientale. La région Méditerranée est dominée par un réchauffement significatif, une forte diminution des précipitations moyennes annuelles et une augmentation de leur variabilité pendant la saison chaude et sèche. À partir d'observations, plusieurs auteurs ont rapporté une augmentation de la température moyenne annuelle d'environ 0,005 °C par an, dans le bassin méditerranéen (Quereda Sala et al., 2000 ; Moisselin et al., 2002) pour atteindre en été la valeur de 0,01 °C par an entre 1976 et 2000, soit l'un des taux les plus élevés sur l'ensemble du globe (Xoplaki et al., 2003 ; Solomon et al., 2007). Une augmentation de la probabilité de survenance d'événements propices aux inondations et aux sécheresses est suggérée dans les projections climatiques réalisées dans le cadre du troisième exercice d'intercomparaison des modèles climatiques (CMIP3) [Gao et al., 2006].



## Des ressources en eau critiques

Dans la région Méditerranée, l'eau est une ressource rare, fragile, très variable dans le temps et inégalement répartie dans l'espace, comme le montre la distribution des

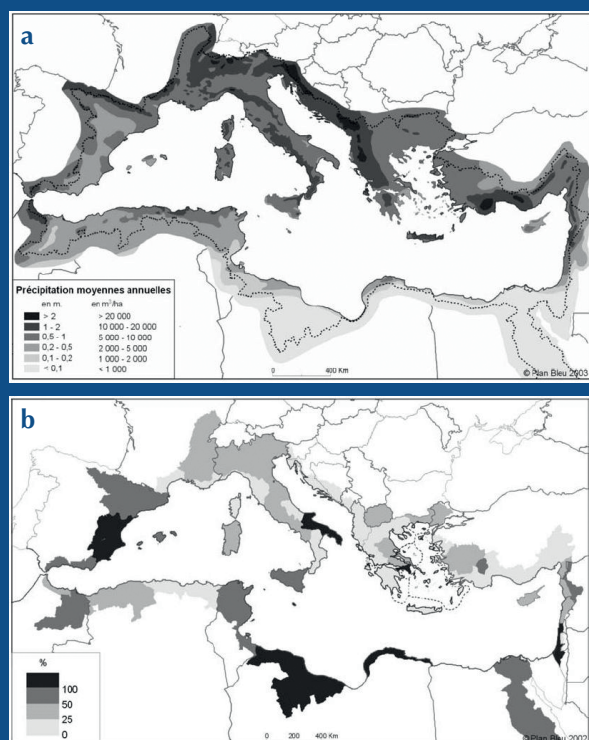


Figure E2 - a) Schéma montrant la répartition des précipitations moyennes annuelles sur le bassin méditerranéen. (Source : Plan Bleu, 2004).  
 b) Schéma montrant l'indice d'exploitation actuel des ressources en eau naturelles et renouvelables (ratio entre les prélèvements et les ressources internes et externes), dans le bassin méditerranéen. (Source : Plan Bleu, 2004).

dotée de moins de 1 000 m<sup>3</sup>/hab/an) s'élève à 180 millions d'habitants dont 60 millions en situation de « pénurie » (i.e. moins de 500 m<sup>3</sup>/hab/an). Vingt millions de Méditerranéens n'ont pas accès à l'eau potable, notamment dans les pays au Sud et à l'Est. Aux tensions sur les ressources naturelles en eau viennent s'ajouter des dégradations et des pollutions d'origine humaine qui en modifient le régime ou la qualité, ce qui limite encore davantage les possibilités d'usage en raison des risques pour la santé.

supérieure à 10 000 km<sup>2</sup>, parmi lesquels seuls 6 ont une surface supérieure à 50 000 km<sup>2</sup> : le Nil, le Rhône, l'Èbre, le Pô et les bassins de la Moulouya et de l'Evros (figure 1). Tous ensemble, ces 21 bassins versants représentent seulement 42 % de la surface de l'ensemble des bassins versants du bassin méditerranéen. Le reste du réseau hydrologique est constitué de petits et moyens bassins versants, associés aux nombreuses rivières qui prennent leur source dans les massifs montagneux. Les petites rivières, qui se tarissent durant l'été, peuvent devenir torrentielles à l'automne, provoquant des crues rapides et des inondations. L'apport en eau à la mer de l'ensemble des rivières varie donc fortement, dans l'espace et dans le temps, et elle constitue un terme important du bilan d'eau de la mer

Méditerranée mais difficile à estimer précisément, d'autant plus que la construction de barrages durant le dernier siècle a réduit de moitié l'apport en eau douce à la mer (voir l'encadré à la page 26).

Le bassin méditerranéen est donc un système particulièrement complexe où se produisent de nombreuses interactions et rétroactions entre les processus de méso-échelle<sup>(1)</sup> des différents compartiments du système Terre (atmosphère, océan et continent). Ces processus jouent un rôle prédominant sur le climat régional et sur les phénomènes hydrométéorologiques extrêmes. En particulier, il s'agit des fortes précipitations et des crues soudaines pendant l'automne, des vents violents qui peuvent être associés à de fortes houles pendant l'hiver, et des vagues

de chaleur et des sécheresses, accompagnées d'incendies de forêt, durant l'été. La capacité à prévoir de tels événements à fort impact reste faible, en partie en raison de la disponibilité limitée de données expérimentales. Cela résulte aussi d'une compréhension encore partielle des processus couplés à différentes échelles et de leurs interactions non-linéaires dont la représentation est encore parcellaire dans les modèles de prévision numérique du temps et du système climatique régional. Les mécanismes fondamentaux d'un système si complexe demandent encore à être mieux compris, dans l'espoir de parvenir à de meilleures prévisions de ces phénomènes extrêmes, dans un contexte de changement climatique. Ce qui est en jeu, ce sont aussi les conséquences sur la vie des populations locales et leur possibilité de gérer les impacts. Compte tenu de ces enjeux scientifiques et sociétaux, le programme HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment) a pour objectifs :

- d'améliorer la compréhension et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée, avec un intérêt particulier porté à la prévisibilité et à l'évolution des événements intenses associés au cycle de l'eau ;
- d'évaluer la vulnérabilité sociale et économique de cette région aux événements extrêmes et sa capacité d'adaptation.

D'abord initié par la communauté française océan-atmosphère, en 2005, le projet HyMeX est devenu un programme multidisciplinaire et international pour répondre à ces ambitions à la fois scientifiques et sociétales. Pour progresser dans ces questions, la stratégie proposée pour HyMeX est de surveiller et modéliser le système couplé océan-atmosphère-surfaces continentales, sa variabilité (de l'échelle de l'événement aux échelles saisonnières et interannuelles), et ses caractéristiques sur une décennie (2010-2020) inscrite dans un contexte de changement global. La recherche multidisciplinaire et la base de données développée au sein d'HyMeX devraient contribuer à améliorer les systèmes d'observation et de modélisation, en particulier du système climatique couplé, à mieux prévoir les événements extrêmes et à simuler, avec

(1) C'est-à-dire d'échelles spatiales qui vont du kilomètre à la centaine de kilomètres et d'échelles temporelles qui vont de l'heure à la journée. Il s'agit, par exemple, des phénomènes orageux et des vents forts comme le mistral.



plus de précision, la variabilité intra-saisonnière et interannuelle du cycle de l'eau. Enfin, elles devraient contribuer à fournir des directives pour des mesures d'adaptation, en particulier dans le contexte du changement global.

Les questions scientifiques traitées dans HyMeX sont organisées autour de cinq thématiques principales (figure 2). Les

deux premières concernent l'étude de la variabilité et de la tendance de la composante « lente » du cycle de l'eau. Il s'agit de mieux quantifier et simuler (i) les termes du bilan en eau de la mer Méditerranée, qui pilotent la circulation océanique du bassin, et (ii) les composantes naturelles et anthropiques (e.g. irrigation) du cycle hydrologique continental à l'échelle régionale. Les deux

thématiques suivantes portent sur les événements intenses : (i) les pluies intenses et les crues rapides, et (ii) les flux océan-atmosphère intenses, thématique qui inclut aussi bien les phénomènes atmosphériques responsables de ces flux (e.g. vents régionaux) que leurs conséquences sur l'océan (e.g. formation de convection océanique et d'eaux denses). Très transverse, la cinquième

## La mer Méditerranée « perd » de l'eau

La région Méditerranée « exporte » de l'eau vers les autres régions du globe, ce qui se traduit par un bilan d'eau E-P positif pour la mer Méditerranée, compensé par le flux d'eau net au détroit de Gibraltar (E : évaporation ; P : précipitations ; R : flux des rivières). Le transport atmosphérique d'humidité dans la région Méditerranée se fait d'ouest et de nord-ouest

vers l'est et le sud. Le transport de l'humidité est principalement zonal en hiver (Fernandez et al., 2003) et il est orienté au sud-est l'été, ce qui explique, en partie, le lien entre la mer Méditerranée et la mousson africaine (Rowell, 2003 ; Fontaine et al., 2010) et, plus généralement, les téléconnexions avec les grands systèmes atmosphériques (moussons ouest-africaine et indienne, Oscillation Nord-Atlantique, El Niño, etc.) [Alpert et al., 2006].

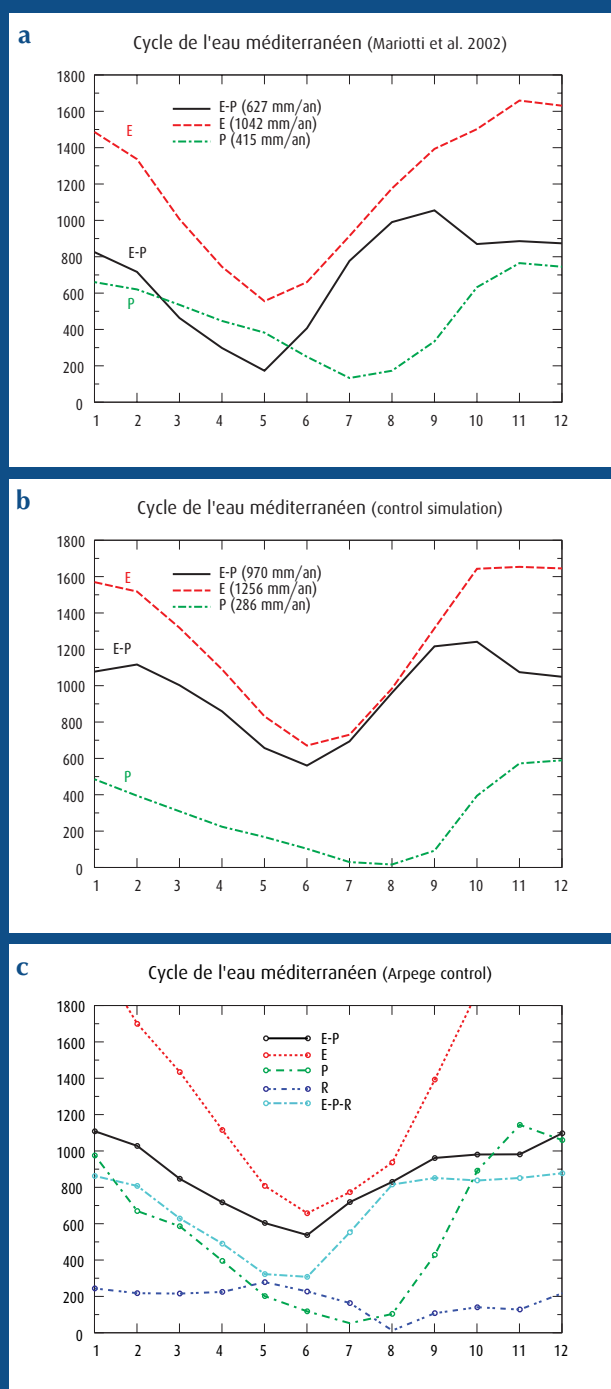
Le transfert de l'eau continentale vers la mer, via les rivières, s'effectue au travers d'un système hydrologique complexe qui lie végétation, surface continentale, rivières et aquifères. Le débit des rivières qui en résulte est loin d'être négligeable, puisqu'il représente environ 10 % du bilan d'eau E-P-R (Struglia et al., 2004 ; Ludwig et al., 2009). Les estimations de ce débit varient considérablement : Béthoux (1979) donne une valeur de 270 mm par an alors que Mariotti et al. (2002) proposent une valeur plus faible de 100 mm par an. La climatologie établie par Somot (2005), à partir de la base de données RivDis (Vörösmarty et al., 1996), donne 200 mm par an.

Le flux net au détroit de Gibraltar procure une estimation indépendante de la valeur moyenne du bilan d'eau de la mer Méditerranée. Cependant, son estimation (644 mm par an, d'après Baschek et al., 2001) n'est pas cohérente avec le terme E-P du bilan (500 mm par an, d'après Mariotti et al., 2002).

Malgré la conception récente de modèles du système climatique régional (Somot et al., 2008 ; Artale et al., 2009 ; Drobinski et al., 2012), la simulation du bilan d'eau de la mer Méditerranée reste imprécise, comme le montre la figure E3. Des progrès doivent être réalisés dans la modélisation des rivières, compte tenu de la forte influence qu'elles peuvent avoir sur l'évolution du bilan d'eau, et donc de la salinité, dans un scénario de changement climatique (Somot et al., 2006).

Obtenir une estimation précise de chaque terme du bilan d'eau de la mer Méditerranée, à toutes les échelles de temps (saisonnière, interannuelle, décennale, et les tendances pour le XXI<sup>e</sup> siècle), est donc un objectif ambitieux du projet HyMeX pour l'observation et la modélisation du climat méditerranéen.

Figure E3 - Cycle annuel moyen, moyenné sur toute la mer Méditerranée (période 1979-1993), des précipitations (P), de l'évaporation (E), du débit des rivières (R), et des bilans E-P et E-P-R, exprimés en mm. Ce cycle est obtenu : a) à partir d'observations (Mariotti et al., 2002) ; b) du modèle climatique configuré pour la région Méditerranée LMDZ ; c) du modèle ARPEGE-Climat. En abscisses sont reportés les numéros de mois de l'année.



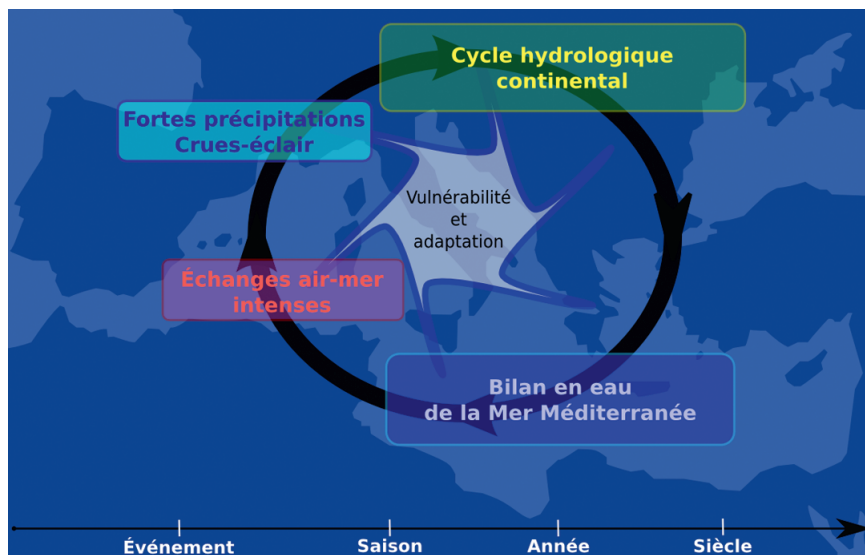


Figure 2 - Les cinq thématiques scientifiques du projet HyMeX en relation avec les échelles d'intérêt du cycle hydrologique. (Source : HyMeX International Science Plan, 2010 ; disponible sur [www.hymex.org](http://www.hymex.org)).

thématique relève plus particulièrement du domaine des sciences humaines et sociales. Elle concerne la vulnérabilité et la capacité d'adaptation des territoires et des peuples méditerranéens aux événements intenses, dans le contexte du changement climatique.

## Une stratégie multi-échelles

Le caractère multi-échelles et multicompartiments du système étudié a conduit à définir une stratégie de campagne reposant sur l'imbrication des domaines et des

périodes d'observation, et sur l'utilisation de différentes plateformes instrumentées complémentaires (moyens aéroportés, ballons, sites au sol, bateaux et satellites).

### Un emboîtement de périodes et de zones de mesure

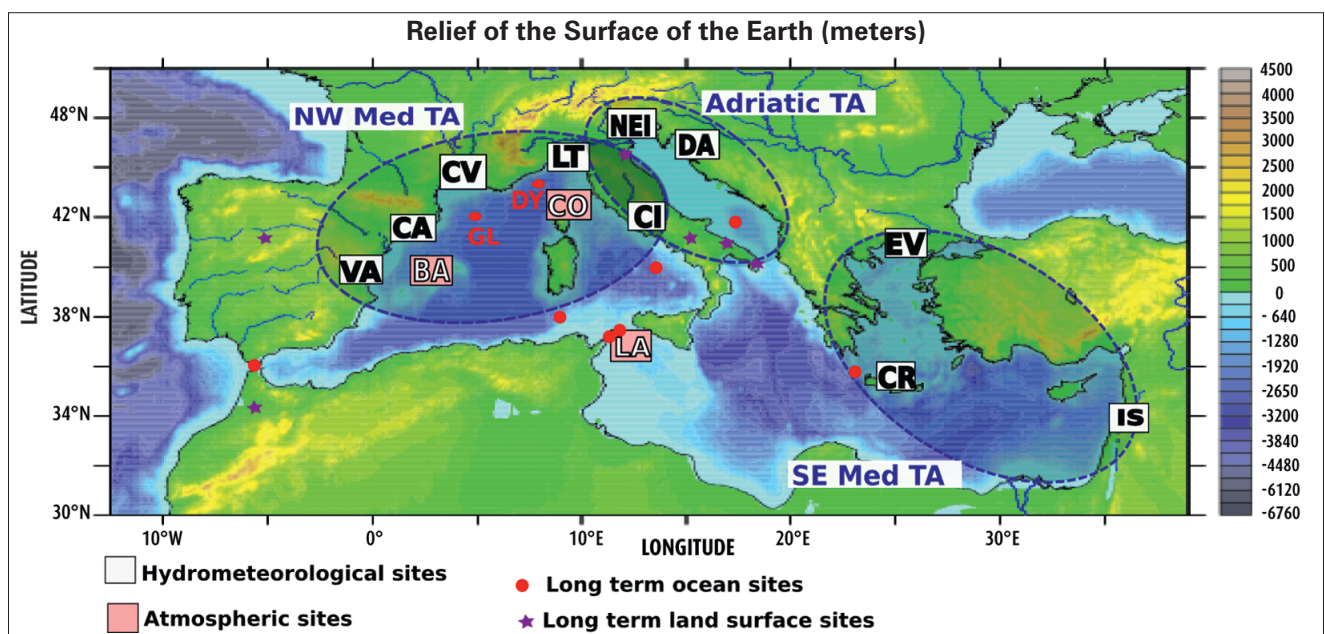
Le projet HyMeX prévoit des observations simultanées au sein des trois compartiments – atmosphérique, continental et océanique – et à leurs interfaces, ainsi que des observations dans le domaine des sciences humaines et sociales. Il organise sa stratégie en périodes d'observations emboîtées à trois niveaux dans le temps et l'espace.

L'étude de la composante « lente » du cycle de l'eau, contrôlant en particulier la variabilité saisonnière et inter-annuelle du bilan d'eau de la mer Méditerranée et du cycle de l'eau continentale, fait l'objet d'un programme d'observations à long terme (LOP) qui s'étendent de 2010 à 2020, sur tout le bassin méditerranéen. Cette collecte de données provient des réseaux d'observations opérationnels et des observatoires de recherche existants (MOOSE, OHM-CV, etc.), répartis sur tout le bassin. Elle est renforcée par des mesures d'opportunité comme des observations sur des navires marchands circulant en Méditerranée.

Dans trois régions d'intérêt, une période d'observations renforcées (EOP) est destinée à renforcer, à l'aide de nouveaux instruments, les réseaux opérationnels et les observatoires de recherche existants pour des études de bilan d'eau et de certains processus couplés, susceptibles de jouer un rôle important dans la formation de phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (figure 3). Ces observations sont collectées sur 4 ans, à partir de septembre 2011, avec un pic des moyens déployés de septembre 2012 à décembre 2013. Les régions d'intérêt sont les bassins nord-occidental et adriatique ainsi que la région hellénique.

Enfin, le cœur du dispositif HyMeX est constitué par deux périodes d'observations spéciales (SOP) dans le bassin nord-occidental. Cette zone présente

Figure 3 - Localisation des zones de mesures du projet HyMeX. La période d'observation longue LOP couvre l'ensemble du bassin. La période d'observations renforcées EOP (2011-2014) cible 3 régions d'intérêt : Méditerranée nord-occidentale (NW Med), Adriatique (Adriatic), et Méditerranée sud-orientale (SE Med). Les périodes d'observations spéciales (SOP) ciblent la région de la Méditerranée nord-occidentale. (Source : HyMeX International Science Plan, 2010).



l'avantage de regrouper la majorité des objets d'étude d'HyMeX : pluies intenses et crues rapides, cyclogénèses et vents régionaux forts, convection océanique (golfe du Lion), transition côtier-plateau-hauturier, grand fleuve (Rhône) et rivières intermittentes, etc. Les périodes d'observations spéciales sont essentiellement dédiées à des études de processus qui requièrent le déploiement d'instruments de recherche spécifiques, embarqués à bord d'avions, de bateaux ou de ballons. La première période d'observations spéciales est organisée du 5 septembre au 6 novembre 2012 et elle est dédiée à la documentation des événements précipitants intenses et des inondations. La deuxième période d'observations spéciales est organisée du 1<sup>er</sup> février au 15 mars 2013 et elle est dédiée à la formation d'eaux denses et de convection océanique sous l'effet des vents forts dans le golfe du Lion. Les objectifs détaillés, associés à ces périodes d'observations spéciales, et les moyens spécifiques déployés sont décrits précisément dans un second article dans ce numéro, pages 37-47 (Ducrocq et al., 2013).

En ce qui concerne les observations sur le long terme, la collecte des données repose, en large partie, sur des réseaux de mesure internationaux existants. Un lourd travail consiste à identifier les données et, soit à les transférer sur la base de données HyMeX, soit à négocier une interopérabilité entre les différentes bases de données. La mutualisation des moyens et des données est aussi l'approche adoptée avec certains projets financés par ailleurs. En ce qui concerne la contribution française à ce programme d'observation sur le long terme, on peut souligner le rôle clé de certains services d'observation tels que MOOSE et l'OHM-CV pour l'océanographie et l'hydrométéorologie continentale. L'objectif de MOOSE est le suivi des masses d'eau, de la circulation thermohaline et des flux de matière en Méditerranée nord-occidentale. Le système d'observation repose, en particulier, sur des bouées de surface, pour les mesures dans les couches de surface océanique et atmosphérique, sur des lignes instrumentées, pour l'observation de la dynamique sur toute la colonne d'eau et à haute fréquence temporelle, et sur des gliders et des navires dits « de façade » qui opèrent le long de la façade méditerranéenne du territoire français. Les gliders sont des véhicules sous-marins instrumentés, déployés en collaboration avec des partenaires européens. Ils effectuent de

grandes radiales côte-large (Nice-Calvi, Toulon-Sardaigne, Marseille-42°N-5°E-Baléares et Banyuls-42°N-5°E-Baléares) pour observer, sur le long terme, des zones clé comme les pentes continentales, les talus et les zones de convection. Les deux bouées de Météo-France (dans la zone de convection et au large de Nice) ont vu leur instrumentation renforcée, pour la LOP HyMeX, avec l'ajout de capteurs qui mesurent le rayonnement, la salinité et les précipitations à la surface, et avec des lignes instrumentées d'une vingtaine de capteurs de température et de salinité, jusqu'à 250 m sous les bouées. Une action majeure a aussi consisté en l'équipement en systèmes d'observations de navires marchands qui effectuent la liaison hebdomadaire Marseille-Alger. Ils ont été équipés de systèmes d'observations autonomes, développés en grande partie pour les besoins de cette activité :

- un système (SEOS) de mesures des flux radiatifs, courte et grande longueurs d'onde, de température de surface de la mer, d'humidité, de vent et de précipitations ;
- un thermosalinomètre pour la salinité et la température de surface de la mer ;
- et un capteur GPS pour la mesure du délai zénithal total (contenu intégré en vapeur d'eau).

Sur terre, de nombreux sites sont dédiés à la surveillance hydrométéorologique. Opéré par l'INRA, le super-site de Crau-Camargue est dédié à l'étude de la variabilité du bilan d'eau, à l'échelle de l'aquifère, en intégrant l'hydrologie souterraine et les activités anthropiques comme l'irrigation. Le site est équipé de capteurs d'humidité du sol sur surfaces irriguées et prairies naturelles, ainsi que de stations de mesures de flux sur différentes cultures et écosystèmes. Les pratiques agricoles de plusieurs fermes de la région sont aussi recensées pour une meilleure compréhension du cycle hydrologique. En raison de son exposition aux pluies intenses et aux crues éclair, l'Observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais est équipé, pour sa part, d'un réseau opérationnel d'observations pluviométriques, opéré par Météo-France, par le Service de prévision des crues et par Électricité de France. Il est également couvert par les radars météorologiques du réseau ARAMIS, situés à Bollène, à Sombadelle et à Nîmes, et par un ensemble de stations de mesures du niveau de l'eau et du débit des rivières. Pour la période d'observation à long terme de

HyMeX, ce dernier réseau a été renforcé par plusieurs systèmes de mesures des débits sans contact, ainsi que par l'instrumentation de super-sites hydrologiques, pour une meilleure compréhension de la réponse hydrologique de paysages cévenols typiques. Parmi ces paysages, on peut citer : Tourgueille et Valescure, pour les régions montagneuses des Cévennes, Le Pradel, site représentatif des régions de plaine avec des couverts de vignes et de végétation naturelle sur des sols marno-calcaires, et l'observatoire MEDYCYSS, pour les zones karstiques. Ces observations du système hydrométéorologique s'accompagnent, pour le département du Gard, d'une surveillance sociologique de la mobilité, des systèmes d'alerte aux crues et du rôle des médias en situation de crise.

La mise en œuvre de plateformes de modélisation numérique, éventuellement couplées, accompagne ce programme d'observations tant, en temps réel, pour le déploiement des moyens instrumentés pendant les phases terrain, que pour l'interprétation des données recueillies pendant les périodes d'observations (voir section ci-dessous).

## Modélisation

Les processus représentés dans nos différents modèles vont des processus de petite échelle (par exemple, la simulation des fortes précipitations et la réponse hydrologique) aux processus à l'échelle du bassin (par exemple, le transport de l'humidité atmosphérique ou la circulation thermohaline de la mer Méditerranée). La variété de ces processus nécessite de valider et d'améliorer non seulement chacun des modèles composant cette mosaïque mais aussi leurs interactions, pour favoriser une compréhension du cycle de l'eau dans son ensemble, ce qui permettra de prévoir son évolution dans toutes ses composantes et pour une large gamme d'échelles.

La stratégie de modélisation adoptée se veut donc cohérente avec la stratégie expérimentale. Par une approche intégrant modèles numériques de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales, cette stratégie vise à mieux simuler et prévoir l'évolution de l'environnement, à toutes les échelles de temps et d'espace. Cela nécessite une approche combinant une gamme de modèles allant des modèles de petite échelle jusqu'aux modèles du système climatique régional. Les modèles de



petite échelle, qui représentent au plus près les processus observés, seront directement confrontés aux mesures faites sur le terrain et ils serviront à l'élaboration de représentations conceptuelles de ces processus dans les modèles climatiques régionaux de plus grande échelle. Cet effort d'amélioration des représentations des processus dans les modèles est indispensable pour mieux prévoir les événements hydrométéorologiques extrêmes, mais aussi l'évolution du cycle de l'eau aux échelles intrasaisonnières à interannuelles et dans le cadre du changement global du climat. Les détails de la stratégie de modélisation à fine échelle et pour la prévision météorologique et hydrologique sont décrits dans Ducrocq et al. (2013), dans ce numéro, pages 37-47.

En ce qui concerne la modélisation à l'échelle du bassin, une large partie des activités de modélisation climatique régionale du projet HyMeX est commune avec l'action MED-CORDEX du programme CORDEX du WCRP. Ce programme consiste en la régionalisation, à une résolution de 50 km ou moins, des simulations CMIP5 réalisées à l'échelle globale avec une résolution typique de 200-300 km. Dans le cadre de l'action conjointe HyMeX/MED-CORDEX, plusieurs types de simulations seront réalisés :

- une simulation de type « hindcast » où les modèles climatiques régionaux seront pilotés par les réanalyses ERA-40 et ERA-Interim sur la période 1960-2010 ;

- une simulation HyMeX où les modèles climatiques régionaux seront pilotés par des réanalyses (e.g. ERA-Interim) obtenues au fil de l'eau sur la période d'observations HyMeX, entre 2010 et 2020 ;

- une simulation de type « CMIP5 », où les modèles climatiques régionaux seront pilotés par des runs CMIP5 sur la période 1950-2100.

Parmi une dizaine de modèles, trois modèles français régionaux couplés océan-atmosphère (Drobinski et al., 2012 ; L'Heveder et al., 2012) participent à ce programme conjoint HyMeX/MED-CORDEX. Il s'agit des modèles couplant les modèles atmosphériques régionaux ALADIN, LMDZ et WRF au modèle océanique NEMO, dans sa configuration régionale méditerranéenne (NEMO-MED), avec des résolutions horizontales comprises entre 20 et 50 km, pour le modèle atmosphérique, et entre le 8° et 12° de degré, pour le modèle océanique (respectivement, 14 km et 7 km environ). La configuration ALADIN/NEMO-MED8 utilise les modèles de surface et de routage ISBA et TRIP. Les configurations LMDZ/NEMO-MED8 et WRF/NEMO-MED12 (configuration appelée MORCE) utilisent respectivement les modèles ORCHIDEE et RUC.

À cela s'ajoutent les simulations en mode forcé des modèles d'atmosphère, d'océan et de surface seuls. Dans la communauté française, si l'on retrouve

les mêmes modèles atmosphériques dans une configuration semblable à la version couplée, davantage de modèles et de configurations sont utilisés pour les surfaces continentales et pour l'océan. Pour les surfaces continentales, les modèles hydrologiques MODCOU et RAPID s'ajoutent aux modèles ORCHIDEE et ISBA/TRIP. La modélisation du cycle hydrologique de certaines parcelles a aussi pour objectif de représenter, à haute résolution spatiale, les flux d'eau de surface, de prendre en compte les activités anthropiques qui influencent ces flux (irrigation, gestion du couvert végétal et activités non agricoles), et de coupler ces flux avec la nappe pour l'évaluation des ressources en eau. La modélisation est constituée d'une série de modèles (e.g. SURFEX et STICS, pour certaines surfaces agricoles, et MODFLOW, pour la nappe). Pour la modélisation de la circulation de la mer Méditerranée, on trouve les modèles NEMO-MED12 et NEMO-MED36, au 12° et au 36° de degré (environ 3 km de résolution), pour l'ensemble du bassin, et SYMPHONIE et ROMS pour le sous-bassin nord-occidental.

## Monitoring à l'échelle du bassin : du satellite à l'assimilation de données

Les données des satellites d'observation de la Terre représentent un moyen essentiel d'accéder à des observations à des échelles de temps comprises entre un jour et plusieurs années, sur l'ensemble du bassin méditerranéen, et, en particulier, au-dessus de la mer Méditerranée où peu de données *in situ* sont disponibles. Ces données permettent de spatialiser les mesures de terrain *in situ* et d'évaluer les modèles numériques utilisés dans HyMeX aux différentes échelles d'espace et de temps.

Pour l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales, de nombreux produits satellitaires sont déjà fournis par divers centres : classifications nuageuses, température et humidité de l'air, vents déduits des déplacements nuageux, précipitations, température et vent à la surface de la mer, flux de surface, flux radiatifs au sommet de l'atmosphère, aérosols, etc. Certains de ces produits s'avèrent de qualité satisfaisante et en partie adaptés aux objectifs d'HyMeX. Néanmoins, la plupart de



Au deuxième plan l'ATR 42 et au troisième plan le Falcon 20 de SAFIRE. L'ATR 42 a volé en amont des systèmes précipitants pour la documentation des flux d'humidité alimentant les orages et le Falcon 20 a volé à proximité des orages pour documenter les microphysiques des systèmes nuageux. (© CNRS, Philippe Drobinski).

ces produits satellitaires sont difficilement exploitables au large des côtes, ce qui, pour une mer de cette taille, limite l'usage optimal de ces données (e.g. données SSM/I pour les flux de surface sur la mer Méditerranée). Or, l'apport d'humidité et l'initiation des systèmes précipitants se produisent habituellement au large des côtes de la mer Méditerranée qui sont aussi mal documentées par les observations au sol, en raison de la portée limitée à environ 100 km des radars côtiers, par exemple. À partir de 2014, l'accès aux nouvelles mesures satellitaires des précipitations de la mission NASA-JAXA GPM, via une collaboration avec le projet HyMeX, sera sans nul doute un réel progrès. Ce n'est cependant pas suffisant pour résoudre les problèmes associés à la mesure de précipitations sur mer et en terrain très accidenté. Enfin, certains produits n'ont pas la précision ou la résolution spatiale ou temporelle requises, ou bien ne permettent pas d'accéder aux variables géophysiques (e.g. AMSU-B/MHS donne des informations sur les précipitations mais ne permet pas d'y accéder de façon quantitative).

Pour pallier l'absence de données fiables ou l'existence de données disparates dans l'espace et le temps, la fusion par assimilation de données satellitaires et *in situ* est une action essentielle du projet HyMeX. Pour l'océan, il s'agit de construire une réanalyse à haute résolution de la circulation thermohaline de la mer Méditerranée. La réanalyse repose sur la configuration NEMO-MED12 au 12° de degré du modèle océanique et sur le schéma d'assimilation SAM2. Les données assimilées proviennent de la base de données Coriolis/MyOcean, de mesures *in situ* et altimétriques, et des produits satellitaires de température de surface de la mer (SST). La collecte des mesures *in situ* repose sur un réseau de contacts en Europe et en Afrique. Une action similaire est entreprise pour les propriétés de la surface terrestre sur le bassin méditerranéen. Les variables caractéristiques de la végétation et de l'humidité du sol sont maintenant couramment produites à partir d'observations satellitaires, en quasi-temps réel. Les produits satellitaires de végétation et d'humidité du sol sont disponibles sur une période commençant à la fin des années 1980, à travers la base de données HyMeX<sup>(1)</sup>. Pour l'assimilation des données, le modèle ISBA-A-gs

inclut, via le module de surface SURFEX, un algorithme d'assimilation qui permet l'assimilation conjointe de l'indice foliaire et de l'humidité de surface du sol. Ce système d'assimilation de données de surface est maintenant pré-opérationnel sur la France et sera étendu à l'ensemble de la région Europe-Méditerranée. Il sera couplé au modèle de routage des rivières TRIP, à une résolution spatiale de 0,5°.

## Base de données

Mise en place dans le cadre du projet HyMeX par l'OMP et par l'IPSL, la base de données a pour but d'archiver, de façon pérenne, les différents types de données accumulées pendant le projet et de faciliter leur exploitation. Les données intégrées dans la base de données concernent les données des trois périodes d'observations sur les domaines géographiques correspondants (figure 3). La base de données concerne les observations locales (mesures au sol, aéroports, en mer, etc.) et télédétections (satellites et radars), ainsi que les résultats de modèles. Pour la LOP, cette mise à disposition des données peut être faite par interopérabilité avec des centres de données qui collectent ces observations

ou bien par la mise à disposition des méta-données. Par ailleurs, la base de données devant accueillir les simulations MED-CORDEX a été ouverte (<http://www.medcordex.eu>) avec une interopérabilité avec la base de données HyMeX.

Cette base de données constitue un outil transversal aux diverses thématiques du projet et elle doit favoriser les collaborations entre les différentes disciplines. Ses objectifs généraux sont de donner l'accès le plus simple possible à tous les jeux de données et de leur associer une documentation qui en facilitera l'utilisation. Il s'agit de garantir la pérennité des données pour les études scientifiques au-delà du projet HyMeX.

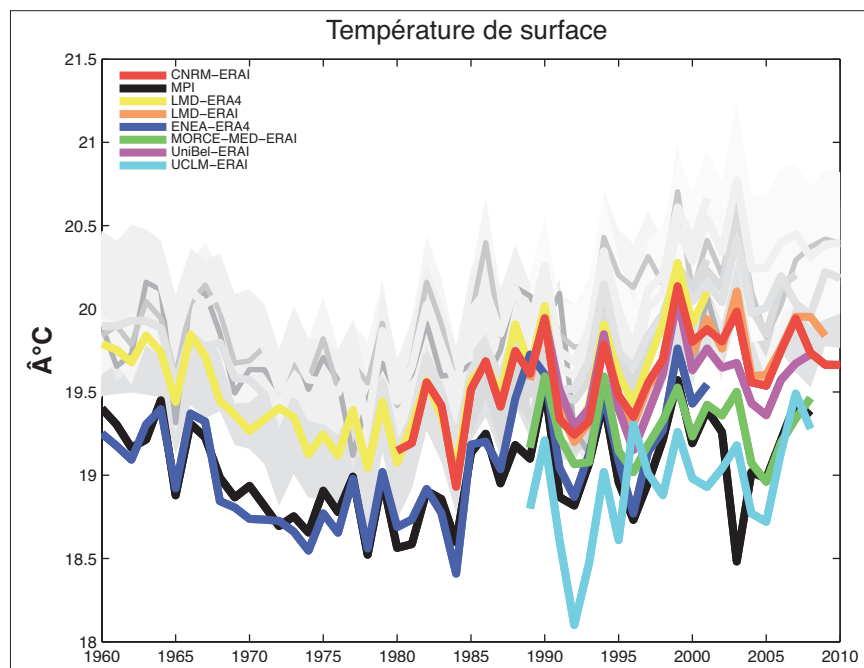
## Exemples de travaux HyMeX-France

Depuis le début des périodes d'observation longue et renforcée, des travaux ont été réalisés en France sur les volets « Bilan d'eau de la mer Méditerranée » et « Cycle hydrologique continental ». Ils se sont appuyés sur des simulations réalisées (dont une partie dans le cadre du programme joint HyMeX/MED-CORDEX) et sur des observations collectées spécifiquement.

## Bilan d'eau de la mer Méditerranée

Depuis 2010, la modélisation climatique régionale a largement été dédiée aux activités suivantes :

Figure 4 - Variabilité interannuelle de la température moyenne de la surface de la mer Méditerranée (SST, en °C), sur la période 1960-2010, telle que simulée par les modèles de climat régionaux couplés, forcés par des réanalyses : ENEA (ERA40), MPI (ERA40), CNRM (ERAInt), LMD (ERA40, ERAInt), MORCE-MED (ERAInt), Univ Belgrade (ERA-Int), UCLM/UPM (ERAInt). Les températures observées sont représentées par les courbes grises (Reynolds OISST, Marullo OISST, Rixen/MedAtlas-II, EN3) et une estimation de leurs incertitudes est figurée par la zone grisée. (Source : C. Dubois).



(1) Par exemple, les séries satellitaires LAI GEOLAND2 et humidité du sol ESA-CCI couvrent une période de 30 ans. Voir aussi les sites <http://www.geoland2.eu> et <http://www.esa-soil-moisture-cci.org>. Dans la base de données HyMeX seront intégrées les données à partir de 1991.



- la mise en place de nouvelles configurations des composantes des différents modèles du système climatique régional ;
- la mise au point des trois modèles français régionaux couplés océan-atmosphère ;
- la réalisation des premières simulations climatiques régionales couplées océan-atmosphère, avec pilotage par les réanalyses ERA40 et ERA-INTERIM sur la période 1960-2010 ;
- les premières validations de ces simulations (Herrmann et al., 2011 ; Claud et al., 2012 ; Flaounas et al., 2012 et 2013 ; L'Heveder et al., 2012) ;
- et la production des premières simulations atmosphériques régionales pilotées par des simulations CMIP5, sur la période 1950-2100.

Mieux simuler la température de surface de la mer Méditerranée et sa variabilité a été une motivation essentielle dans le

développement des modèles régionaux couplés océan-atmosphère. En effet, la température de surface de la mer, dans cette région, est mal reproduite dans les modèles de circulation générale alors qu'elle contrôle, en grande partie, l'évaporation et les précipitations au-dessus de la mer et qu'elle influence l'évolution des dépressions méditerranéennes (Lionello et al., 2003 ; Gaertner et al., 2007) et des vents de surface qui forcent la circulation thermohaline. La figure 4 démontre la capacité des modèles régionaux couplés océan-atmosphère à simuler la variabilité temporelle de la SST, mais aussi sa variabilité spatiale (non montrée). Prolonger ces simulations réalisées dans le cadre de HyMeX/MED-CORDEX peut permettre la reconstruction de champs de SST avant l'existence d'observations satellitaires ou la projection dans des scénarios du climat futur.

La figure 5 présente l'évolution pluri-annuelle de la température de surface de la mer, mesurée par la bouée Golfe du Lion de Météo-France, qui s'inscrit dans le dispositif d'observations à long terme de HyMeX (figure 5a et 5b), et la comparaison aux points de grille les plus proches dans les modèles couplés régionaux du CNRM (ALADIN/NEMO-MED8/ISBA/TRIP) et de l'IPSL (MORCE). Dans chacun des modèles, la variabilité interannuelle comme les variations intra-saisonnières (haute fréquence) de SST sont bien représentées (figure 5c). Cependant, les deux simulations présentent un biais globalement froid sur l'ensemble de la période, de  $-0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le CNRM et de  $-0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour MORCE. Des corrélations de 96 % et 97 % sur la température de l'air à 2 m, de 96 % et 99 % sur la pression de surface, et de 80 % et 88 % sur la vitesse du vent à 10 m, sont obtenues avec les observations de la bouée Golfe du Lion (LION), respectivement pour les modèles CNRM et MORCE. Les observations supplémentaires (flux radiatifs et précipitations), qui sont désormais collectées par ces bouées, permettront, par la suite, d'amplifier l'effort de validation des modèles couplés régionaux sur la Méditerranée et les travaux d'intercomparaison dans le cadre d'HyMeX.

Les observations satellitaires des précipitations sont essentielles pour mieux quantifier le bilan d'eau de la mer Méditerranée. Sur ce plan, a été réalisée une nouvelle climatologie à haute résolution des occurrences d'événements fortement précipitants sur le bassin méditerranéen depuis 1999, à partir d'observations fournies par l'ensemble des satellites *NOAA* et *MetOp-A*, à bord desquels volent le sondeur micro-ondes AMSU-B et son successeur MHS. Suivant les périodes considérées, cela représente entre un et cinq satellites, ce qui assure au moins

une observation deux fois par jour, mais souvent bien davantage. Outre les informations qu'une telle climatologie fournit sur la variabilité des précipitations sur la mer Méditerranée (où l'absence de données *in situ* a empêché jusqu'à présent de telles

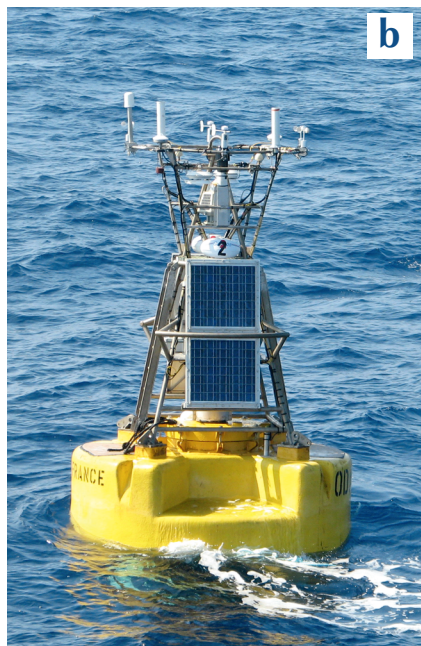
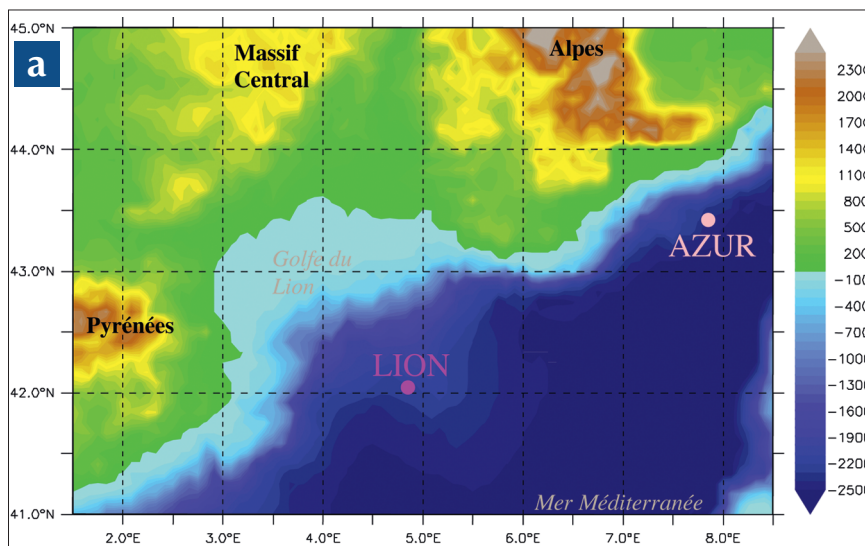
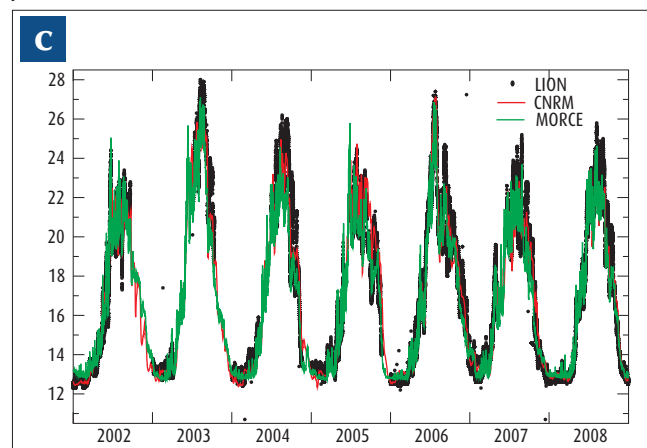
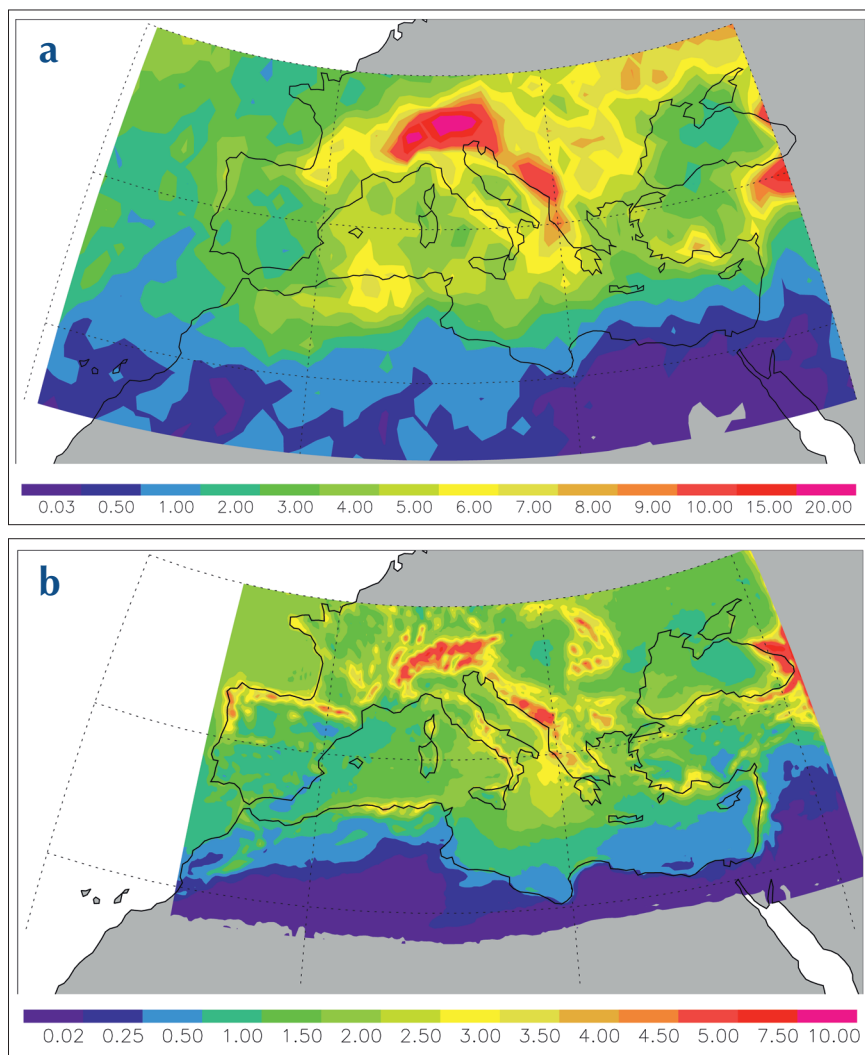


Figure 5 - a) Température de surface de la mer (en  $^{\circ}\text{C}$ ), mesurée par la bouée LION de Météo-France située à  $4,7^{\circ}\text{E}$ - $41,8^{\circ}\text{N}$  ;  
b) Bouée LION. (© Météo-France, Clotilde Dubois) ;  
c) Comparaison aux modèles couplés régionaux du CNRM (NEMOMED8-TRIP-ALADIN50km) et au modèle MORCE de l'IPSL (NEMOMED12-WRF20km), entre janvier 2002 et décembre 2008.







▲ Figure 6 - Comparaison des événements précipitants observés par satellite et simulés par le modèle du système climatique régional MORCE :

a) occurrence moyenne des pluies (en  $^{\circ}/^{\circ}$ ) sur le bassin méditerranéen à une résolution de  $1^{\circ}$  déduites de l'instrument AMSU-B sur NOAA17, pour la période 2003-2008. (Source : Claud et al., 2012) ;

b) taux de pluie moyen simulé (en mm par jour) à une résolution d'environ  $0,2^{\circ}$ , pour la même période. (Source : Claud et al., 2012).

études), elle permet de valider des simulations numériques, que ce soit à l'échelle régionale, sur plusieurs années, ou pour des études de cas. Cette nouvelle climatologie a ainsi permis de montrer le bon réalisme des pluies convectives simulées par la plateforme de modélisation régionale MORCE (figure 6).

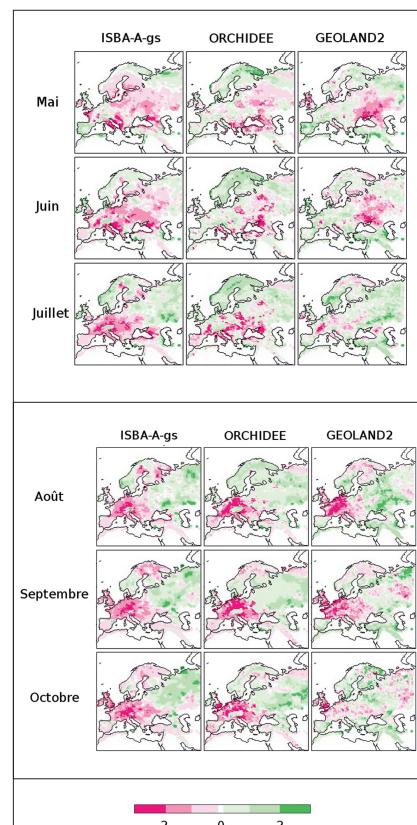
## Cycle hydrologique continental

Sur terre, les travaux ont porté sur l'évaluation de la variabilité du bilan hydrique (évapotranspiration et précipitation), sur les sécheresses et leur relation aux canicules au travers des mécanismes couplés surface-atmosphère (Stéfanon et al., 2012a, 2012b et 2012c), et sur les ressources en eau. La représentation dans les modèles de climat régionaux de la

variabilité du terme du bilan hydrique lié aux rivières a bien progressé (Szczypa et al., 2012). Cet indicateur est particulièrement pertinent pour l'étude des sécheresses. L'analyse des données satellitaires et la modélisation régionale ont aussi montré que la sécheresse contribue à décaler de quelques semaines le cycle phénologique qui contrôle le développement de la végétation et l'évapotranspiration (Szczypa et al., 2012 ; Stéfanon et al., 2012c). L'année 2003 a particulièrement été étudiée car elle est exceptionnelle à plus d'un titre. Le printemps 2003 a été anormalement froid en Russie et en Europe centrale, alors que s'installait une sécheresse persistante dans une partie de l'Europe de l'Ouest. La figure 7 montre les anomalies normalisées (de -3 à +3 écarts-types) d'indice foliaire en 2003 par rapport aux 10 années de la période 1999-2008. Elle montre qu'une anomalie négative de

l'indice foliaire est d'abord observée à l'est (en mai), puis qu'elle se déplace vers l'ouest. L'accord est bon entre des observations satellitaires (produit GEOLAND2 dérivé de l'instrument SPOT-VGT) et les modèles ISBA-A-gs et ORCHIDEE qui simulent la photosynthèse et la croissance de la végétation, en lien avec le climat et l'humidité du sol. L'automne (octobre) fait exception avec une situation observée proche de la normale alors que les modèles indiquent une persistance de l'anomalie d'indice foliaire. Cela montre qu'il est possible d'améliorer la représentation de l'humidité du sol dans les modèles et que les observations satellitaires offrent la possibilité de valider de futures versions des modèles.

Le déficit en eau dans le sol, durant les sécheresses, se traduit par une modification du cycle hydrologique spécifique en termes de précipitations. Cette réponse diffère entre les plaines continentales, où température de surface et évaporation sont largement contrôlées par la convection locale, et les zones côtières et montagneuses où les brises de montagne et de mer favorisent l'advection d'air frais et humide



▲ Figure 7 - Anomalies normalisées (de -3 à +3 écarts-types) d'indice foliaire (ou LAI - Leaf Area Index) en 2003 par rapport aux 10 années de la période 1999-2008, à partir d'observations satellitaires (produit GEOLAND2 dérivé de l'instrument SPOT-VGT) et des simulations par les modèles ISBA-A-gs et ORCHIDEE. (Source : Szczypa, 2012).



◀ Figure 8 - Trois stations de flux :  
a) sur vergers. (© INRA, Sébastien Guarrigues)  
b) sur prairie irriguée. (© INRA, Nadine Bertrand) ;  
c) sur prairie sèche (coussouls).  
(© INRA, Nadine Bertrand)

et la formation de précipitations (Stéfanon et al., 2012b). En Méditerranée, l'occurrence de sécheresses est importante et elle a des conséquences importantes sur l'utilisation des eaux. Dans le cadre d'HyMeX, le cas particulier de la zone Crau-Camargue est étudié en détail, car cette zone présente une diversité de surfaces allant de zones steppiques (les coussouls de Crau) aux zones humides (Camargues) [figure 8]. Les enjeux sociétaux et environnementaux concernent la durabilité de la nappe de la



Crau, dont le bilan hydrique est étroitement lié à l'irrigation par les eaux de la Durance, et le biseau salé, partie de l'aquifère côtier envahi par l'eau de mer, affecté par la remontée du niveau de la mer. Une représentation détaillée des flux hydriques anthropiques (irrigations, prélèvements industriels et domestiques) est en cours et devrait permettre de mieux appréhender le rôle des redistributions d'eau dans les échanges surface-atmosphère. Par ailleurs, un certain nombre de sites de flux sont mis en œuvre sur des couverts

végétaux encore mal décrits au stade actuel (steppe, vergers et zones humides du delta du Rhône).

Ainsi la figure 9 montre-t-elle le flux cumulé de drainage annuel sur les prairies irriguées du domaine, calculé par le modèle STICS de l'INRA pour toutes les parcelles de la zone. L'encart montre la comparaison de la différence de flux d'eau sur un canal d'irrigation jaugé entre l'entrée et la sortie (en bleu), avec la simulation des quantités d'eau apportées sur les parcelles irriguées avec l'eau de ce canal. En vert, la simulation a été réalisée avec les données de la station climatique du Merle (à côté de Salon-de-Provence). En marron, les simulations ont été réalisées avec les analyses climatiques SAFRAN du CNRM.

## Organisation nationale et internationale

D'initiative française, HyMeX est organisé à un niveau international. La coordination internationale est assurée par l'International Scientific Steering Committee (ISSC). Son cadrage scientifique et la mise en œuvre du projet sont appuyés par un comité exécutif international. Un bureau de projet, localisé au CNRM-GAME à Toulouse, assiste le travail de ces comités.

Plus de 400 scientifiques, qui proviennent de plus de 20 pays, participent à HyMeX, tant dans les sciences de l'atmosphère, de l'hydrologie et de l'océanographie que dans les sciences

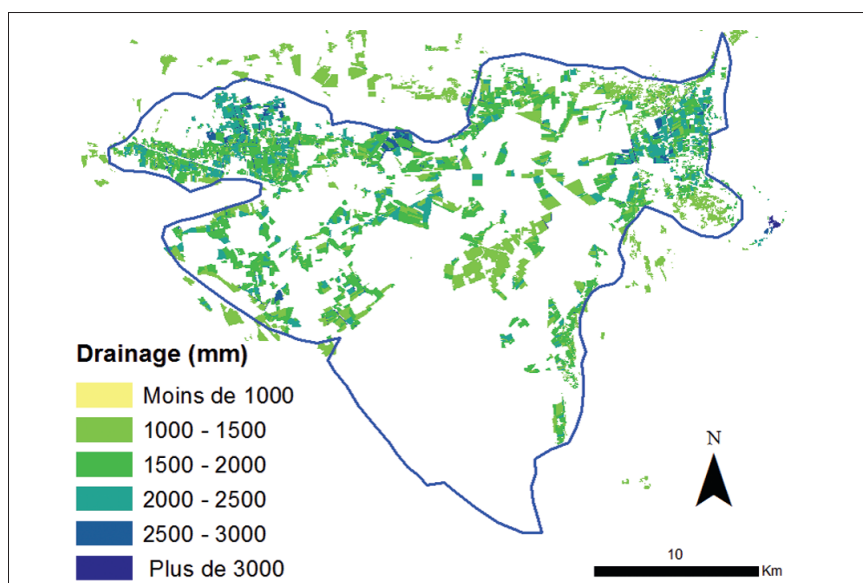
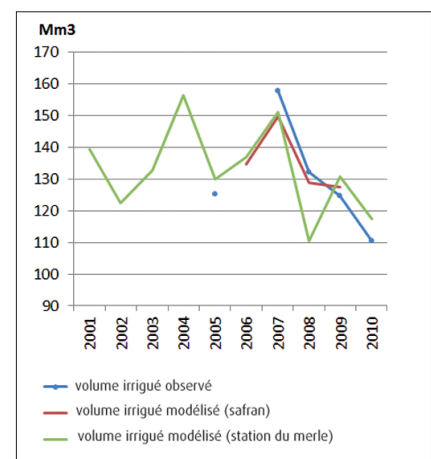


Figure 9 - Carte de drainage annuel des prairies irriguées, principale source d'alimentation de la nappe. La variabilité observée vient des propriétés du sol, des calendriers d'irrigation et de la dimension des parcelles. (Remerciements à R. Lecerf).





humaines, et ils sont impliqués dans les différentes structures du programme. Le projet bénéficie de l'existence de plusieurs projets HyMeX fédérateurs dans d'autres pays et de consortiums pan-nationaux : HyMeX-France, HyMeX-Italie et HyMeX-Espagne. En France, HyMeX s'inscrit dans le programme interdisciplinaire MISTRALS, dédié à la compréhension du fonctionnement du bassin méditerranéen. Les principaux partenaires français d'HyMeX sont le CNRS, Météo-France, le CNES, IRSTEA, l'INRA, l'ANR et la collectivité territoriale de Corse. Participent aussi au programme

HyMeX : l'IRD, l'IFSTARR, l'IGN, le BRGM, le CEA, l'ONERA, Mercator-Océan, les universités d'Avignon, Aix-Marseille, Clermont-Ferrand, Corse, Grenoble, Littoral Côte d'Opale, Montpellier, Perpignan, Pierre-et-Marie-Curie, Polynésie Française, Sud Toulon-Var, Toulouse, Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, ainsi que l'École des mines d'Alès, INP Toulouse et Grenoble INP, et l'Office de l'Environnement de la Corse. HyMeX bénéficie aussi du concours du Service de prévision des crues du Grand Delta, de la Direction générale de l'armement.

HyMeX est labellisé par le Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) et ses deux composantes CLIVAR (au travers du programme MED-CLIVAR) et GEWEX, et par le Programme mondial de recherche météorologique (WWRP) via sa composante THORPEX, en particulier. Au sein du WCRP, HyMeX est à l'initiative de la composante « Méditerranée » du programme CORDEX, appelée MED-CORDEX.

## Sigles utilisés

|          |   |
|----------|---|
| AMSU     | Advanced Microwave Sounding Unit  |
| ANR      | Agence nationale de la recherche  |
| CLIVAR   | CLimate VARIability and predictability  |
| CMIP3    | Coupled Model Intercomparison Project – phase 3   |
| CMIP5    | Coupled Model Intercomparison Project – phase 5   |
| CNES     | Centre national d'études spatiales  |
| CNRM     | Centre national de recherches météorologiques   |
| CNRS     | Centre national de la recherche scientifique  |
| CORDEX   | COoRdinated Downscaling Experiment  |
| DT/INSU  | Division technique de l'INSU  |
| EOP      | Enhanced Observation Period   |
| GEWEX    | Global Energy and Water Cycle Experiment  |
| GIEC     | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat                          |
| GPM      | Global Precipitation Measurement  |
| HyMeX    | Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment                                      |
| INRA     | Institut national de la recherche agronomique   |
| INSU     | Institut national des sciences de l'univers   |
| IPSL     | Institut Pierre-Simon Laplace   |
| IRSTEA   | Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture |
| JAXA     | Japan Aerospace Exploration Agency  |
| LA       | Laboratoire d'aérodynamique   |
| LAI      | Leaf Area Index   |
| LOP      | Long Observation Period   |
| MEDEX    | MEDiterranean EXperiment  |
| MHS      | Microwave Humidity Sounder  |
| MISTRALS | Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales                           |
| MODIS    | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer   |
| MOOSE    | Mediterranean Ocean Observing System on Environment                                     |
| MORCE    | MODEl of the Regional Coupled Earth system  |
| MSG      | Meteosat Second Generation  |
| NASA     | National Aeronautics and Space Administration   |
| NEMO     | Nucleus for European Modelling of the Ocean   |
| OHM-CV   | Observatoire Hydro-Météorologique – Cévennes-Vivaraïs                                   |
| OMP      | Observatoire Midi-Pyrénées  |
| SAFIRE   | Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement             |
| SAFRAN   | Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige              |
| SOP      | Special Observation Period  |
| SPOT/VGT | Satellites pour l'observation de la Terre/Végétation                                    |
| STICS    | Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard                                |
| SURFEX   | Surface modelling platform  |
| THORPEX  | The Observing System Research and Predictability Experiment                             |
| WCRP     | World Climate Research Program  |
| WWRP     | World Weather Research Program  |



## Remerciements

Basé sur une initiative française, HyMeX a été élaboré par un groupe international de scientifiques et ce projet est actuellement financé par un grand nombre d'agences, spécialement en France, en Allemagne, en Espagne, en Italie, aux États-Unis d'Amérique, aux Pays-Bas et en Suisse. Des informations détaillées sur les partenariats peuvent être trouvées sur le site d'HyMeX, [www.hymex.org](http://www.hymex.org). Le projet HyMeX n'aurait pu être lancé sans le soutien des organismes de recherche français. Le programme MISTRALS du CNRS a permis de construire une dynamique forte autour de la recherche sur la Méditerranée, avec les contributions de l'ANR, du CNES, du CNRS, de Météo-France, des universités françaises, de la collectivité territoriale de Corse et du 7<sup>e</sup> PCRD. Un tel projet n'aurait pas pu voir le jour sans de très nombreuses personnes, depuis les personnels administratifs jusqu'aux directions des organismes en passant par les personnels de la DT/INSU et de SAFIRE. Nous aimerions toutes les remercier pour leur contribution à HyMeX.

## Les affiliations des auteurs

- (1) Institut Pierre-Simon Laplace/Laboratoire de météorologie dynamique (IPSL/LMD) — Palaiseau, France
- (2) Météo-France/Centre national de recherches météorologiques — Toulouse, France
- (3) Institut Pierre-Simon Laplace/Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (IPSL/LATMOS) — Guyancourt, France
- (4) Institut national des sciences de l'univers/Division technique (INSU/DT) — La Seyne, France
- (5) École nationale supérieure de techniques avancées ENSTA-ParisTech — Palaiseau, France
- (6) Laboratoire de recherche en géodésie (LAREG), Institut géographique national — Marne-la-Vallée, France
- (7) Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE) — Grenoble, France
- (8) Hydrosiences Montpellier - Montpellier, France
- (9) Unité de recherche hydrologie-hydraulique, IRSTEA — Lyon, France
- (10) Géosciences Montpellier - Montpellier, France
- (11) Environnement méditerranéen et modélisation des agrohydrosystèmes (EMMAH), INRA — Avignon, France
- (12) Étude des structures, des processus d'adaptation et des changements de l'espace (ESPACE), université Nice Sophia-Antipolis - Nice, France
- (13) Centre national d'études spatiales (CNES) - Toulouse, France
- (14) Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer — Villefranche-sur-Mer, France
- (15) Laboratoire d'aérodynamique — Toulouse, France
- (16) Laboratoire d'étude du rayonnement et de la matière en astrophysique (LERMA), Observatoire de Paris - Paris, France
- (17) Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - Orléans, France
- (18) Département géotechnique, eau et risques, IFSTTAR - Nantes, France
- (19) Centre de formation et de recherche sur les environnements méditerranéens (CEFREM) - Perpignan, France
- (20) PACTE — Grenoble, France
- (21) Observatoire Midi-Pyrénées - Toulouse, France
- (22) Érosion torrentielle, neige et avalanches, IRSTEA — Grenoble, France
- (23) Centre de météorologie spatiale, Météo-France — Lannion, France
- (24) Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE) — Aix-en-Provence, France
- (25) Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) — Palaiseau, France
- (26) Laboratoire de météorologie physique (LAMP), Observatoire de physique du Globe de Clermont-Ferrand — Aubière, France
- (27) Mediterranean Institute of Oceanography (MIO) — Marseille, France
- (28) Institut Pierre-Simon Laplace/Laboratoire d'océanographie et du climat, expérimentations et approches numériques (IPSL/LOCEAN) — Paris, France

## Bibliographie

- Alpert P., M. Baldi, R. Ilani, S. Krichak, C. Price, X. Rodó, H. Saaroni, B. Ziv, P. Kishcha, J. Barkan, A. Mariotti et E. Xoplaki, 2006 : Relations between climate variability in the Mediterranean region and the Tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust. Dans : *Mediterranean Climate Variability*. Eds P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo, Elsevier.
- Artale V., S. Calmanti, A. Carillo, A. Dell'Aquila, M. Herrmann, G. Pisacane, P. M. Ruti, G. Sannino, M. V. Struglia, F. Giorgi, X. Bi, J. S. Pal et S. Rauscher, 2009 : An atmosphere-ocean regional climate model for the Mediterranean area: Assessment of a present climate simulation. *Clim. Dyn.*, 35, 721-740.
- Baschek B., U. Send, J. Garcia Lafuente et J. Candela, 2001 : Transport estimates in the Strait of Gibraltar with a tidal inverse model. *J. Geophys. Res.*, 112, 31, 033-31,044.
- Béthoux J. P., 1979 : Budgets of the Mediterranean sea. Their dependence on the local climate and on the characteristics of the Atlantic waters. *Oceanol. Acta*, 2, 157-162.
- Claud C., B. Alhammoud, B.M. Funatsu, C. Lebeaupin-Brossier, J.P. Chaboureaud, K. Béranger et P. Drobinski, 2012 : A high resolution climatology of precipitation and deep convection over the Mediterranean region from operational satellite microwave data: Development and application to the evaluation of model uncertainties. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 785-798.
- Drobinski P., C. Flamant, J. Dusek, P. H. Flamant et J. Pelon, 2001 : Observational evidence and modeling of an internal hydraulic jump at the atmospheric boundary layer top during a tramontane event. *Boundary Layer Meteorol.*, 98, 497-515.
- Drobinski P., S. Bastin, V. Guénard, J. L. Caccia, A. M. Dabas, P. Delville, A. Protat, O. Reitebuch et C. Werner, 2005: Summer mistral at the exit of the Rhône valley. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 353-375
- Drobinski P., A. Anav, C. Lebeaupin-Brossier, G. Samson, M. Stéfanon, S. Bastin, M. Baklouti, K. Béranger, J. Beuvier, R. Bourdallé-Badie, L. Coquart, F. D'Andrea, N. De Noblet-Ducoudré, F. Diaz, J. C. Dutay, C. Ethe, M. A. Foujols, D. Khvorostyanov, G. Madec, M. Mancip, S. Masson, L. Menut, J. Palmieri, J. Polcher, S. Turquet, S. Valcke et N. Viovy, 2012 : Modelling the regional coupled Earth system (MORCE): Application to process and climate studies in vulnerable regions. *Env. Modelling and Software*, 35, 1-18.
- Ducrocq V., O. Nuissier, D. Ricard, C. Lebeaupin et T. Thouvenin, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern France. Part II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 134, 131-145.

- Ducrocq V., S. Belamari, B. boudevillain, O. Bousquet, P. Cocquerez, A. Doerenbecher, P. Drobinski, C. Flamant, L. Labatut, D. Lambert, M. Nuret, E. Richard, O. Roussot, P. Testor, P. Arbogast, P. A. Ayrat, J. Van Baelen, C. Basdevant, J.-L. Boichard, D. Bourras, C. Bouvier, M.-N. Bouin, O. Bock, I. Braud, C. Champollion, L. Coppola, S. Coquillat, E. Defer, J. Delanoë, G. Delrieu, P. Durand, C. Estournel, N. Fourié, O. Garrouste, H. Giordani, J. Le Coz, Y. Michel, O. Nuissier, G. Roberts, F. Said, A. Schwarzenboeck, K. Sellegri, I. Taupier-Letage, J. P. Vandervaere, 2013 : HyMeX, les campagnes de mesure : focus sur les événements extrêmes en Méditerranée. *La Météorologie*, ce numéro, p. 37-47.
- Fernandez J., J. Saenz et E. Zorita, 2003 : Analysis of wintertime atmospheric moisture transport and its variability over southern Europe in the NCEP-Reanalyses. *Clim. Res.*, 23, 195-215.
- Flaounas E., P. Drobinski, M. Borgia, J. C. Calvet, G. Delrieu, E. Morin, G. Tartari et R. Toffolon, 2012 : Assessment of gridded observations used for climate model validation in the Mediterranean Region: The HyMeX and MED-CORDEX framework. *Env. Res. Lett.*, 7, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024017.
- Flaounas E., P. Drobinski, M. Vrac, S. Bastin, C. Lebeaupin-Brossier, M. Stéfanon, M. Borgia et J.-C. Calvet, 2013 : Precipitation and temperature space-time variability and extremes in the Mediterranean region: evaluation of dynamical and statistical downscaling methods. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1558-y.
- Fontaine B., J. García-Serrano, P. Roucou, B. Rodriguez-Fonseca, T. Losada, F. Chauvin, S. Gervois, S. Sivarajan, P. Ruti et S. Janicot, 2010 : Impacts of warm and cold situations in the Mediterranean Basins on the West African monsoon: Observed connection patterns (1979-2006) and climate simulations. *Clim. Dyn.*, sous presse.
- Gaertner M. A., D. Jacob, V. Gil, M. Domínguez, E. Padorno, E. Sánchez et M. Castro, 2007 : Tropical cyclones over the Mediterranean Sea in climate change simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14711, doi:10.1029/2007GL029977.
- Gao X., J. S. Pal et F. Giorgi, 2006 : Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from high resolution double nested RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03706, doi:10.1029/2005GL024954.
- Georgelin M. et E. Richard, 1996 : Numerical simulation of flow diversion around the Pyrenees: A tramontana case study. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 687-700.
- Giorgi F., 2006 : Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- Grubišić V., 2004 : Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, 2571-2603.
- Guénard V., P. Drobinski, J. L. Caccia, G. Tedeschi et P. Currier, 2006 : Dynamics of the MAP IOP-15 severe mistral event: Observations and high-resolution numerical simulations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132, 757-778.
- Herrmann M., S. Somot, S. Calmanti, C. Dubois et F. Sevault, 2011 : Representation of daily wind speed spatial and temporal variability and intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: Impact of the regional climate model configuration. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1983-2001.
- Köppen W., 1936 : *Das geographische System der Klimate*. In Köpen and Geiger Eds, *Handbuch der Klimatologie* 3. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 46 p.
- Lebeaupin-Brossier C., K. Béranger, C. Deltel et P. Drobinski, 2011 : The Mediterranean response to different space-time resolution atmospheric forcings using perpetual mode sensitivity simulations. *Ocean Modelling*, 36, 1-25.
- L'Heveder B., S. Somot, F. Sevault et L. Li, 2012 : Interannual variability of deep convection in the North-Western Mediterranean Sea simulated with a coupled AORCM. *Clim. Dyn.*, soumis.
- Lionello P., A. Nizzero et E. Elvini, 2003 : A procedure for estimating wind waves and storm-surge climate scenarios in a regional basin: The Adriatic Sea case. *Clim. Res.*, 23, 217-231.
- Ludwig W., E. Dumont, M. Meybeck et S. Heussner, 2009 : River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? *Progress in Oceanography*, 80, 199-217.
- Mariotti A., M. V. Struglia, N. Zeng et K. M. Lau, 2002 : The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea. *J. Clim.*, 15, 1674-1690.
- Moisselin J. M., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre, 2002 : Les changements climatiques en France au xxe siècle : études des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 54, 33-42.
- Plan Bleu, 2004 : L'eau des Méditerranéens : situation et perspectives. *MAP Technical Report Series* No. 158, Athens, 2004, 366 p.
- Quereda Sala J., A. Gil Olcina, A. Perez Cuevas, J. Olcina Cantos, A. Rico Amoros et E. Montón Chiva, 2000 : Climatic warming in the Spanish Mediterranean: Natural trend or urban effect. *Climatic Change*, 46, 473-483.
- Rowell D. P., 2003 : The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian Rainfall Season. *J. Clim.*, 16, 849-862.
- Solomon S., D. Qin, M. Manning, R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T. F. Stocker, P. Whetton, R. A. Wood et D. Wratt, 2007 : Technical Summary. Dans : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Somot S., 2005 : *Modélisation climatique du bassin méditerranéen : variabilité et scénarios de changement climatique*. Thèse de l'université Paul-Sabatier, Toulouse, 333 p.
- Somot S., F. Sevault et M. Déqué, 2006 : Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. *Clim. Dyn.*, 27, 851-879.
- Somot S., F. Sevault, M. Déqué et M. Crépon, 2008 : 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63, 112-126.
- Stéfanon M., F. D'Andrea et P. Drobinski, 2012a : Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Env. Res. Lett.*, 7, doi:10.1088/1748-9326/7/1/014023.
- Stéfanon M., P. Drobinski, F. D'Andrea, C. Lebeaupin-Brossier et S. Bastin, 2012b : Soil moisture-temperature feedbacks at meso-scale during heat waves over Western Europe. *Clim. Dyn.*, soumis.
- Stéfanon M., P. Drobinski, F. D'Andrea et N. de Noblet-Ducoudré, 2012c : Effects of interactive vegetation phenology on the 2003 summer heat waves. *J. Geophys. Res.*, 117, D24103, doi : 10.1029/2012JD018187.
- Struglia M. V., A. Mariotti et A. Filogrosso, 2004 : River discharge into the Mediterranean Sea: climatology and aspects of the observed variability. *J. Clim.*, 17, 4740-4751.
- Szczypta C., 2012 : *Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen*. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 197 p.
- Szczypta C., B. Decharme, D. Carrer, J. C. Calvet, S. Lafont, S. Somot, S. Faroux et E. Martin, 2012 : Impact of precipitation and land biophysical variables on the simulated discharge of European and Mediterranean rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 5437-5486.
- Vörösmarty C. J., B. M. Fekete et B. A. Tucker, 1996 : *Global river discharge database*. RivDIS, Vol. 0 to 7, International Hydrological Programme, Global Hydrological Archive and Analysis Systems, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris, France.
- Xoplaki E., F. J. Gonzales-Rouco, J. Luterbacher et H. Wanner, 2003 : Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Clim. Dyn.*, 20, 723-739.